# 音高线索和节拍类型对音乐拍子追随的影响*

孙丽君 [1] 刘子儒 [1] 杨玉芳 [2]

[1]（南京航空航天大学艺术学院，南京，211106）

[2]（中国科学院心理研究所，北京，100101）

**摘要**:

拍子追随是人类听音乐时自发的身体同步行为。为了探究音高线索和节拍类型对拍子追随的影响，实验中让被试分别在有/无音高的条件下聆听 2/4 或 3/4 拍的音乐，并依据拍子进行同步敲击，记录每次敲击的时间点。结果发现，(1)音高线索提升拍子追随的准确性；(2)2/4 拍音乐追随的准确性比 3/4 拍更高;(3)拍子追随的时间总是提前于音乐的真实拍点。研究不仅揭示了音乐中音高和时间维度的信息如何影响拍子同步，还验证了拍子感知的预期机制及其普遍性。

**关键词**　拍子追随；音高线索；节拍类型；音乐节奏；预期

**分类号** B849

## The Effects of Pitch Cues and Meter Type on Beat Tracking in Music

SUN Lijun[1], LIU Ziru[1], YANG Yufang[2]

[1]（College of Arts, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China）

[1](Institute of Psychology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China）

Abstract:

Beat tracking is a spontaneous bodily synchronization behavior when humans listen to music. To investigate the influence of pitch cues and metre types on beat tracking, participants were asked to listen to music with or without pitch in 2/4 or 3/4 metre, and synchronize their tapping to the beat, while the timing of each tap was recorded.

* 基金项目：国家自然科学基金青年项目(32300865)、教育部人文社会科学研究青年基金（22YJC760086)

The results revealed that (1) pitch cues enhanced the accuracy of beat tracking, (2) music with 2/4 metre obtained better tracking than 3/4, (3) the tap timing always preceded the actual musical beat. Our results not only uncovered how pitch and temporal dimensions in music influence beat perception, but also confirmed a universal prediction mechanism of beat perception.

**Key words：** beat tracking, pitch cues, metre type, musical rhythm, prediction

# 1 引言

音乐是声音组合的艺术形式，能够激发人类情感和身体反应。人们在音乐聆听中经常不由自主地点头、跺脚，产生自发的身体同步运动，并获得愉悦感(Levitin et al., 2018; Smith & Joshi, 2020)。这一过程需要听者从复杂的表层节奏中提取等时间隔的拍子，并做出与之同步的身体动作，即拍子追随，它是人类所具有的重要能力。拍子的感知和同步是感知音乐时间结构的基础，也是体验音乐情绪和理解音乐意义的重要途径(Snyder et al., 2024)。本研究通过探究拍子追随的影响因素，以期更好地理解音乐聆听的本质和规律。

在音乐作品中，拍子通常遵循严格的时间周期。然而，音乐的拍子并不直接通过声学信号明确呈现，甚至在拍点上可能没有任何声音信号。那么，人们如何感知拍子？音乐的重音感知模型认为，拍子感知依赖于响度、音高、时间组织、乐句结构等多种声音线索。在音高维度上，改变旋律轮廓的转折音和提供和声功能稳定的主音更突出。而在时间维度上，持续时间较长和处于节拍强拍位置的音更突出(Parncutt, 1994)。尽管音高和时间两个维度的信息在真实音乐作品中相互交织，共同构成音乐的整体，但是二者的加工方式是独立还是交互，目前研究尚未达成定论。基于脑损伤患者的案例研究发现，部分患者在音高加工方面受损，但节奏加工能力保持正常；另一些患者则无法感知音乐节奏，但音高知觉能力完好(e.g., Piccirilli et al., 2000)。然而，脑电的研究结果表明，二者的加工可能在早期阶段相对独立，晚期阶段存在交互作用(Sun et al., 2020; Zhang et al., 2019)。本研究通过探究音高信息对拍子感知的影响，进一步厘清音高与时间加工的关系，并深入揭示拍子感知的机制。

已有研究发现，音乐的时间组织影响拍子追随的准确性和稳定性。随着节奏复杂性的增加，被试进行同步敲击的准确性有所下降(Kung et al., 2013)。另外，节拍感的强弱对拍子追随也具有一定影响。Patel 等(2005)让参与者聆听等时节奏、强节拍节奏、弱节拍节奏等不同类型的节奏序列，同时要求他们用手打拍子。结果发现，被试对强节拍节奏追随的稳定性优于弱节拍节奏。这可能源于拍子在不同节拍框架下的组合形成和强弱模式差异(江俊等, 2014)。然而，以上研究并未探索在真实音乐作品中，节拍类型对拍子追随的影响。2/4 拍（进行曲风格）和 3/4 拍（圆舞曲风格）是音乐中最常用的两种节拍类型，二者是否对拍子追随具有影响，目前还不清楚。

除了时间信息之外，音高组织以及个体对音高的加工能力也对拍子追随有影响。Pecenka 和 Keller(2009)发现，音高的听觉想象能力与感觉动作同步密切相关，听者对音高的想象越准确，感觉动作同步的准确性和稳定性就越高。Boasson 和 Granot(2012)通过改变音高轮廓方向，探究音高变化对感觉动作同步稳定性的影响。结果发现，音调的上升会增加非同步性和负平均异步值，即在上升的旋律中，打拍的时间节点提前于真实拍点的时间更多。这与表演者弹奏上行旋律时，倾向于加快速度的现象相一致。然而，现有研究非常有限，且仅探究音高在等时间间隔的声音刺激中对拍子追随的影响，并不符合真实音乐中音高和时间的组织形式。因此，音高作为音乐的关键组成部分，在变化丰富的节奏组织中如何影响拍子追随，是一个值得进一步深入探究的问题。

本研究采用感觉同步任务，探究音高线索和节拍类型对拍子追随的影响。通过考察拍子追随的稳定性、准确性和预期性，验证以下 3 个假设：(1)音高信息提升拍子感知，听者在音高变化的条件下，追随的准确性更高。(2)拍子追随受到节拍类型的影响，相比 3/4 拍，听者对 2/4 拍音乐追随的准确性更高。(3)无论是否存在音高线索，听者对 2/4 拍和 3/4 拍音乐的追随总是提前于真实拍点，表现出预期的普遍性。

# 2 方法

## 2.1 被试

采用 G*Power 3.1 软件，双因素完全被试内重复测量设计，效应量 $f$=0.3 (Prince et al., 2009)，依据主效应计算被试量为 17 人(Power=0.80, $\alpha$=0.05)。本次实验共招募了 24 名被试，男性 11 人，平均年龄为 21.2±5 岁。所有被试均为在读的本科生和研究生，右利手且没有精神健康方面的疾病，除了义务教育中的音乐课程外，未接受过任何专业的音乐训练。研究通过了伦理批准，在实验开始前，所有被试签署实验知情同意书，实验结束后，并获得适当报酬。

## 2.2 实验设计

实验设计为2(音高线索：有、无)×2(节拍类型：2/4 拍、3/4 拍)的双因素重复测量设计。为了探究拍子追随的稳定性、准确性和预期性，以敲击间隔(inter-beat interval，ITI)、异步绝对值和异步相对值作为因变量指标。敲击间隔指相邻两次敲击的间隔时间，与音乐拍子间隔时间(600ms)越接近，表明追随越稳定。异步绝对值指敲击的时间点与音乐刺激中真实拍点之间的时间间隔，无论被试的敲击提前还是推迟，均为正值。异步绝对值越大，表明拍子追随的准确性越低。异步相对值指每次敲击的时间点与音乐刺激中真实拍点之间的差值。当被试提前于真实拍点敲击时，差值为负，当被试推迟于真实拍点敲击时，差值为正。

## 2.3 实验材料

音乐材料均选自经典视唱练耳教材。首先，选取 40 首难度中等的视唱曲，其中 20 首为 2/4 拍，20 首为 3/4 拍。出于对乐句结构和音乐完整性表达的考虑，我们截取每首视唱曲的前 8 小节作为实验材料。然后，将音高全部变为标准音 $a^1$，创建 40 首无音高版本的音乐刺激。实验中总共有 80 条音乐材料。为了帮助他们建立音乐的时间框架，我们在音乐开始前加入了 4 个鼓声敲击的预示拍。刺激样例见图 1。

音乐材料通过 Sibelius 8 和 Cubase 13 软件制作。首先，我们在 Sibelius 中创建乐谱，然后将其导出为 Midi 格式。接着，我们将 Midi 文件导入 Cubase 13 进行处理，节奏序列选用 GALAXY STEINWAY 钢琴音色，采用默认参数，延音踏板、琴弦共鸣、采样混合的分别设置为-20%、-20%和 50%。预示拍选用 GARAGE KIT-Full 音色。音乐的速度为每分钟 100 拍，拍点间隔时间为 600ms，音符的力度调整至 127。最后，将音乐材料以双通道混缩的 wav 格式导出。
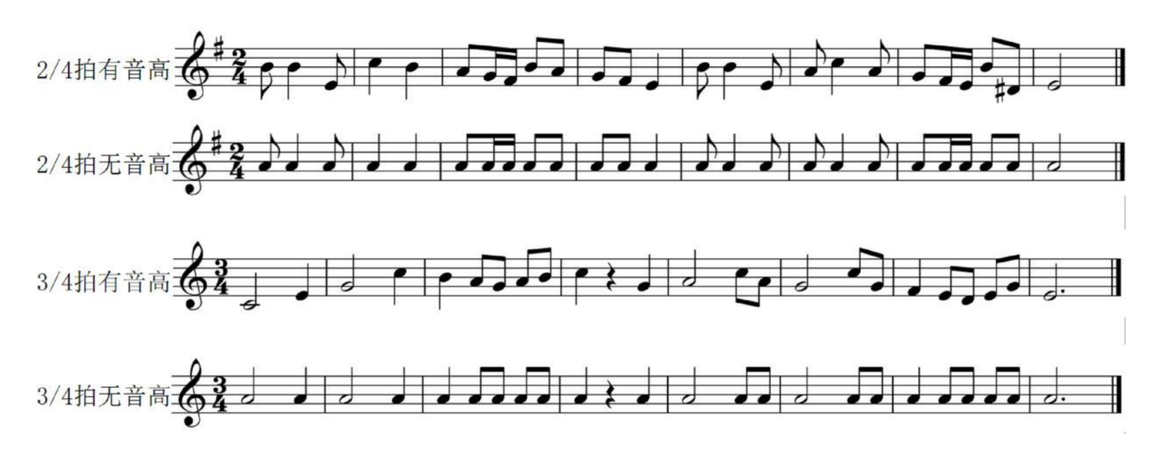



图 1 实验材料样例

## 2.4 实验程序

实验在环境安静无干扰的实验室进行。实验分为两个阶段，第一阶段为学习阶段，由音乐专业的主试训练被试如何在听音乐的同时用手打拍。在被试熟练掌握之后，让被试通过练习刺激熟悉实验流程。第二阶段为正式实验阶段，音乐材料的呈现和数据的采集均通过 E-Prime3 软件实现。被试聆听音乐的同时，用手敲击键盘的空格键，采集被试每次敲击键盘的时间点。实验分四个 block，每个 block 有 20 条刺激，分别是 2/4 拍有音高组、2/4 拍无音高组、3/4 拍有音高组以及 3/4 拍无音高组，block 顺序在被试间平衡，每个 block 之间被试短暂休息。

# 3 结果

以音高线索和节拍类型为自变量，以敲击间隔、异步绝对值和异步相对值为因变量，分

别进行双因素重复测量方差分析，并进行贝叶斯因子分析(吴凡等，2018)，出现球形检验结果显著时，对 p 值进行 Greenhouse-Geisser 校正，采用 Bonferroni 校正法进行多重比较。

在敲击间隔上，如图 2 所示，拍号类型($p$=0.254，$BF_{10}$=0.371, $M_{2/4}$=602.06ms，$SD_{2/4}$=2.61ms; $M_{3/4}$=600.88 ms, $SD_{3/4}$=6.04ms)、音高线索($p$=0.467，$BF_{10}$=0.451, $M_{有音高}$=600.74ms, $SD_{有音高}$=5.17ms，$M_{无音高}$=602.20 ms, $SD_{无音高}$=5.79ms)以及二者的交互作用($p$=0.483, $BF_{10}$=0.165)均不显著。

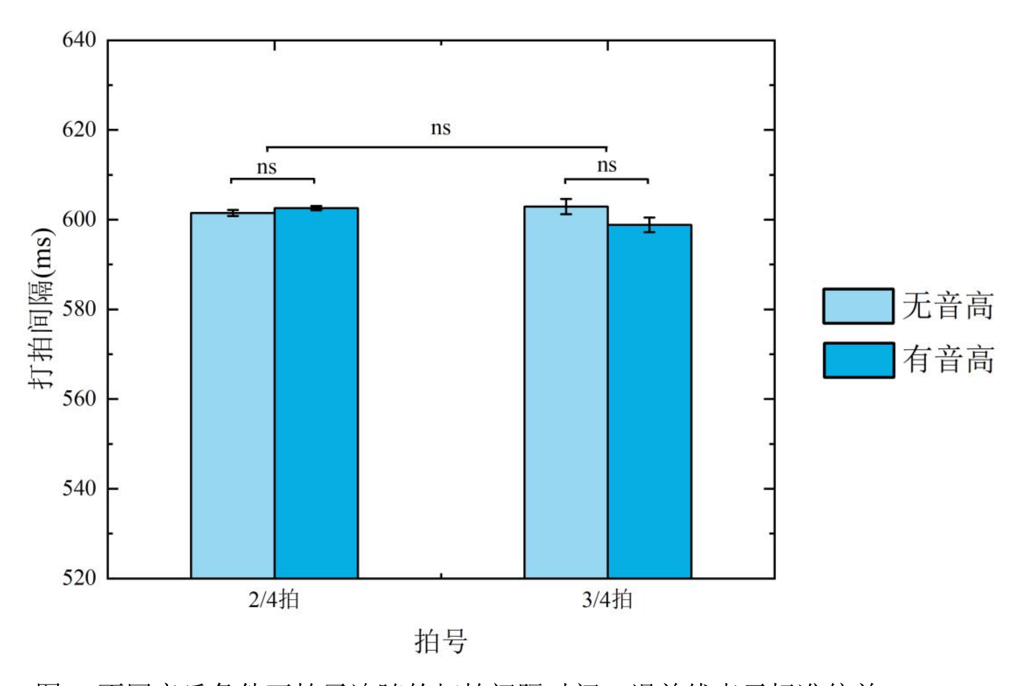



图 2 不同音乐条件下拍子追随的打拍间隔时间，误差线表示标准偏差(SD)

在异步绝对值上，如图 3 所示，拍号类型的主效应显著($F(1, 23)$=7.68, $p$=0.011, $BF_{10}$=4.853, $\eta_p^2$=0.08)，表明拍号类型对拍子追随具有显著的影响。进一步的多重比较分析表明，与 3/4 拍相比($M_{3/4}$=91.99 ms，$SD_{3/4}$=7.12)，被试在 2/4 拍的音乐中($M_{2/4}$=77.07ms，$SD_{2/4}$=6.66)进行拍子追随的准确性更高。音高线索的主效应显著($F(1, 23)$=5.47, $p$=0.028, $BF_{10}$=1.494, $\eta_p^2$=0.19)，与无音高线索相比($M_{无音高}$=87.11 ms， $SD_{无音高}$=6.05)，被试在有音高线索的音乐中($M_{有音高}$=81.96ms，$SD_{有音高}$=6.81)进行拍子追随的准确性更高。音高线索和节拍类型的交互效应不显著($p$=0.986, $BF_{10}$=0.289)。

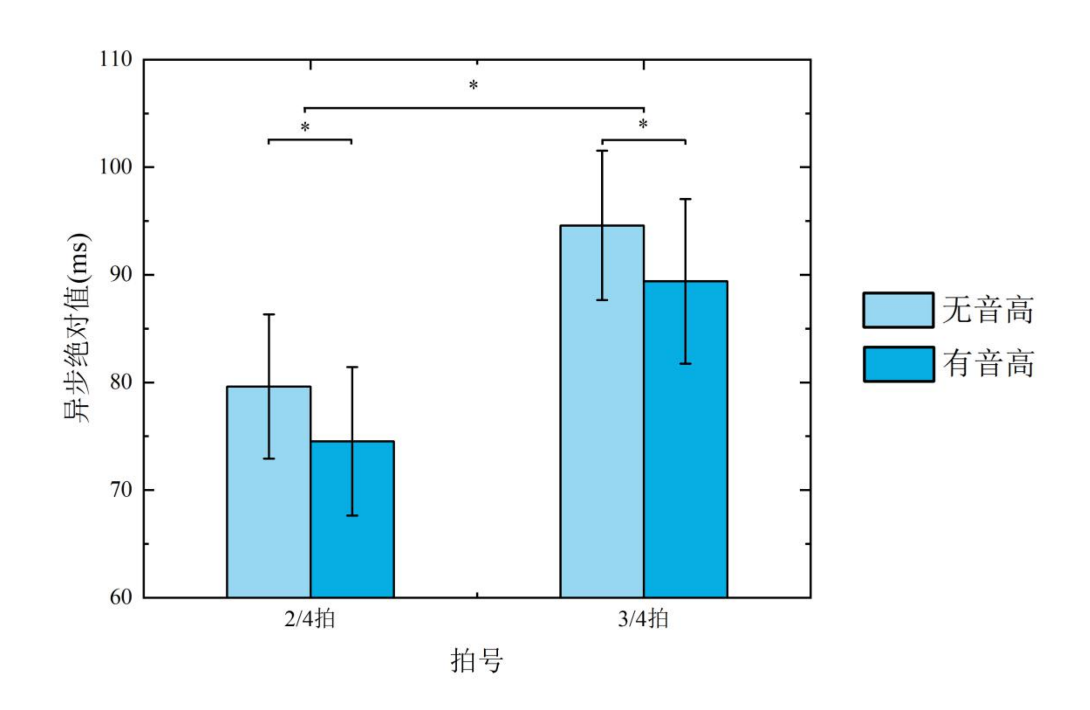



图 3 不同音乐条件下拍子追随的异步绝对值，误差线表示标准偏差(SD)

在异步相对值上，如图 4 所示，拍子追随的时间点总是提前于真实拍子($M_{2/4\ 无音高}$=-60.70ms，$M_{2/4\ 有音高}$=-57.07ms，$M_{3/4\ 无音高}$=-61.29ms，$M_{3/4\ 有音高}$=-49.16ms)，且拍号类型($p$=0.681, $BF_{10}$=0.366)、音高线索($p$=0.253, $BF_{10}$=0.392)以及二者的交互作用($p$=0.374, $BF_{10}$=0.158)均不显著。

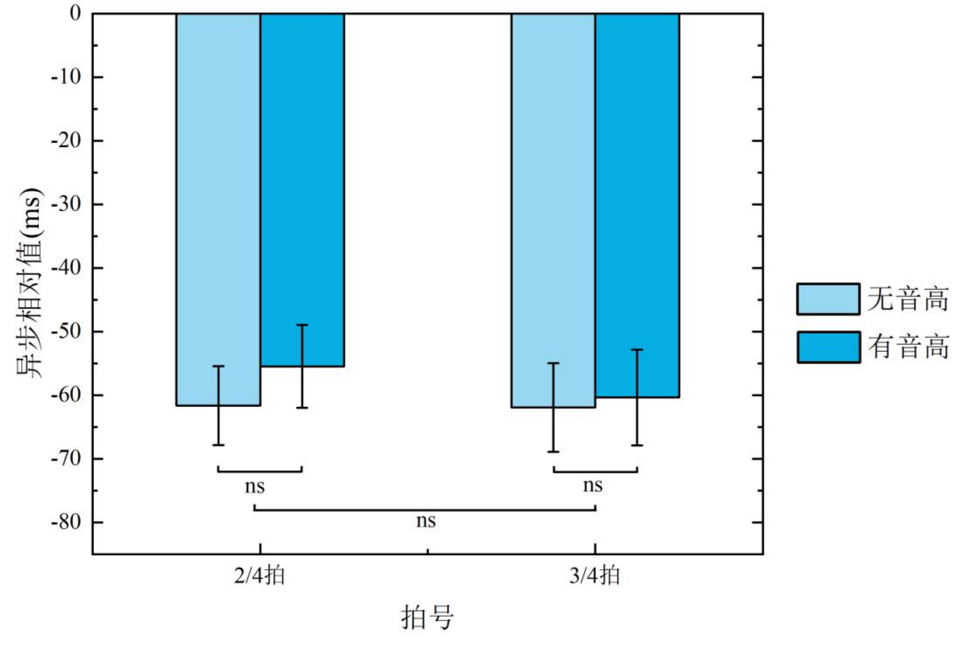



图 4 不同音乐条件下拍子追随的异步相对值，误差线表示标准偏差(SD)

## 4 讨论

我们通过音乐拍子的感觉同步任务，深入探究了音高线索和节拍类型对拍子追随的影响。结果发现，在有音高线索的条件下，个体对拍子追随的准确性显著高于无音高线索的条件，

表明音高信息能够帮助听者更好地与音乐节奏同步，支持了音高和时间信息加工的交互关系。被试对 2/4 拍音乐的追随准确性高于 3/4 拍，这可能与 2/4 拍更为简单的节拍结构有关。另外，音高线索和节拍类型对拍子追随的预期性没有显著影响。这些发现为音乐节奏的感知提供了实证支持，并对音乐教育和音乐治疗等领域具有重要意义。

首先，研究结果发现，听者在有音高线索的条件下，对拍子追随的异步绝对值比无音高线索更低，这表明音高维度的信息有助于拍子追随的准确性。尽管已有研究在一定程度上探讨了拍子追随的影响因素(e.g., Tierney & Kraus, 2013)，但大多仅集中在时间维度(Matthews et al., 2022)，并没有关注音高信息是否能够作为一种提示线索，帮助人们与音乐拍子同步。因此，本研究拓展了以往研究结果，首次提供了音高信息提升拍子感知的直接证据。在有音高线索的条件下，音乐材料包含了丰富的音程关系，既增强了旋律的变化，也要求潜在的和声更替，体现出音乐的重音感知模型中关于旋律变化和和声变化对重音感知的影响效应(Parncutt, 1994)。同时，研究结果进一步支持听者在加工音高和时间这两个维度信息时存在的交互关系，这与以往的行为(Prince et al., 2009)和电生理研究(Sun et al., 2020)结果是一致的。这可能源于跳进、旋律轮廓变更以及和声稳定音等音高重音更大概率的出现在拍点上，强化了对音乐时间结构的知觉。

该结果在教学和临床应用方面具有重要的启示意义。在音乐教学中，教师常忽略利用音高解析来帮助学生理解音乐时间结构(翁建伟, 2021)。本研究揭示了音高线索在音乐节奏感知和同步行为中的重要作用，因此，未来的音乐训练中应更重视音高轮廓、音高稳定性等信息的运用，以提升学生对节奏和节拍的感知能力。在临床上，已有研究发现发育性协调障碍儿童(Whitall et al., 2008)、诵读困难的大学生(Thomson et al., 2006)和双相情感障碍患者(Bolbecker et al., 2011)在同步任务中表现出比对照组更高的敲击间隔变异，如何充分借助音高线索帮助这些特殊群体发展更好的时间追随和感知值得探究。基于拍子追随对情绪诱导的重要作用(Wu et al., 2024)，未来研究还可以通过进一步挖掘音高、拍子追随和音乐紧张感之间的复杂关系，发挥其在音乐治疗方面潜在的应用价值。

其次，节拍类型对拍子追随的准确性具有显著影响，人们在追随 2/4 拍音乐时比 3/4 拍准确性更高。为了排除音乐材料长度的影响，我们分别选取 2/4 拍和 3/4 拍音乐的前 15 拍，进行统计分析，结果再次验证了节拍类型对拍子追随准确性的影响($F(1, 23)=5.67$, $p=0.026$, $\eta_p^2=0.20$)，表明在音乐时长相同的情况下，被试仍然对 2/4 拍音乐材料追随的准确性比 3/4 拍($M_{3/4}=88.67$ ms，$SD_{3/4}=7.34$)更高($M_{2/4}=76.31$ ms，$SD_{2/4}= 6.61$)。虽然有大量研究探究了二者在构建和感知过程中的差异(e.g., Pablos-Martin et al., 2021; Cheng et al., 2022)，但是本研究首次区分了听者在 2/4 拍与 3/4 拍音乐中与拍子同步的差异。与该结果一致，以往研究也发现，无论旋律分辨，还是节奏再现，2/4 拍比 3/4 拍更有优势。与 3/4 拍相比，被试对 2/4 拍旋律中半音音高差异的分辨能力更好(Bergeson & Trehub, 2006)。这可能是因为 2/4 拍作为一种简单且对称的节拍结构，更容易感知和加工。的确，基于动态注意理论，2/4 拍和 3/4 拍的节奏模式对听者的注意力分配提出了不同的要求(Wu et al., 2024)。这种结构上的差异可能导致听者在处理节奏信息时有不同的注意力分布，从而影响他们与音乐同步的能力。

最后，尽管研究结果发现拍子追随的准确性受到音高线索的调节，但是人们对于拍子的预期性行为在不同的音高和节拍条件下是普遍存在的。这一结果表明，拍子追随是一种在声音出现之前做出的预期性反应，而非对声音信号的被动响应。该结果为拍子知觉的相关理论提供实证依据。动态注意理论(dynamic attending theory, DAT)认为，具有周期性时间结构的刺激会导致注意力的分配呈现规律性的动态波动。随着对外界刺激周期性规律的感知，内部注意力节律与刺激的时间结构趋于一致(Large & Jones, 1999)，大脑会产生与拍子同步的神经震荡活动(Large et al., 2023)。通过注意与拍子的耦合同步，人们构建内部的时间表征主动预测外部事件的发生，从而在拍子追随过程中表现出高度的准确性和预测性(孙丽君 & 杨玉芳, 2024)。Patel(2014)提出动作模拟听觉预期假说，认为大脑通过运动皮层的激活来模拟拍子追随动作，使神经活动模式与拍子周期同步，并将这些模式从运动规划区域传递到听觉区域，从而产生对音乐时间结构的预期。该理论从听觉-运动耦合的角度解释了拍子追随中提前敲击的结果。这种对音乐时间结构的预期可能是人类进化的高级认知能力。

## 5 结论

本研究发现，在有音高线索的条件下听者对拍子追随的准确性更高；对 2/4 拍的追随准确性高于 3/4 拍；追随行为总是提前于真实拍点。通过深入探究真实音乐中影响拍子追随的音高和时间因素，本研究揭示了音乐节奏感知的复杂性，对音乐教育和音乐治疗具有深远的启示作用。

## 参考文献


江俊, 王梓梦, 万璇, 蒋存梅. (2014). 音乐时间加工的影响因素. *心理科学进展, 22*(04),650–658.

孙丽君，杨玉芳. (2024). 预期视角下音乐节拍结构的认知与神经机制. *心理科学进展, 32*(10), 1567–1577.

翁建伟. (2021). 立体视唱练耳教学及其学练习要点. *人民音乐*(11), 58–60.

吴凡，顾全，施壮华，高在峰，沈模卫. (2018). 跳出传统假设检验方法的陷阱——贝叶斯因子在心理学研究领域的应用. *应用心理学, 24*(3), 195–202.

Bergeson, T. R., & Trehub, S. E. (2006). Infants perception of rhythmic patterns. *Music Perception, 23*(4), 345–360.

Bliddal, H., Christensen, C. B., Møller, C., Vuust, P., & Kidmose, P. (2021). Neural correlates of beat perception measured using ear-EEG.

Boasson, A., & Granot, R. (2012). Melodic direction's effect on taping. In *Proceedings of the 12th International Conference on Music Perception and Cognition and the 8th Triennial Conference of the European Society for the Cognitive Sciences of Music* (pp. 110–119). Thessaloniki, Greece.

Bolbecker, A. R., Hong, S. L., Kent, J. S., Forsyth, J. K., Klaunig, M. J., Lazar, E. K., & Hetrick, W. P. (2011). Paced finger-tapping abnormalities in bipolar disorder indicate timing dysfunction. *Bipolar disorders, 13*(1), 99–110.

Cheng, T. Z., Creel, S. C., & Iversen, J. R. (2022). How do you feel the rhythm: Dynamic motor-auditory interactions are involved in the imagination of hierarchical timing. *Journal of Neuroscience, 42*(3), 500–512.

Kung, S. J., Chen, J. L., Zatorre, R. J., & Penhune, V. B. (2013). Interacting cortical and basal ganglia networks underlying finding and taping to the musical beat. *Journal of cognitive neuroscience, 25*(3), 401–420.

Large, E. W., & Jones, M. R. (1999). The dynamics of attending: How people track time-varying events. *Psychological review, 106*(1), 119.

Large, E. W., Roman, I., Kim, J. C., Cannon, J., Pazdera, J. K., Trainor, L. J., Rinzel, J., & Bose, A. (2023). Dynamic models for musical rhythm perception and coordination. *Frontiers in Computational Neuroscience. 17*, 1151895.

Levitin, D. J., Grahn, J.A., & London, J. (2018). The psychology of music: Rhythm and movement. *Annual Review Psychology,* 69, 51–75.

Matthews, T. E., Witek, M. A., Thibodeau, J. L., Vuust, P., & Penhune, V. B. (2022). Perceived motor synchrony with the beat is more strongly related to groove than measured synchrony. *Music Perception: An Interdisciplinary Journal, 39*(5), 423–442.

Pablos-Martin, X, Deltenre, P., Hoonhorst, I., Markessis, E., Rossion, B., & Colin, C. (2007). Perceptual biases for rhythm: The Mismatch Negativity latency indexes the privileged status of binary vs non-binary interval ratios. *Clinical Neurophysiology, 118*(12), 2709–2715.

Parncutt, R. (1994). A perceptual model of pulse salience and metrical accent in musical rhythms. *Music Perception, 11*(4), 409–464.

Patel, A. D. , Iversen, J. R., Chen, Y., & Repp, B. H. (2005). The influence of metricality and modality on synchronization with a beat. *Experimental brain research*, 163, 226–238.

Patel, A. D., & Iversen, J. R. (2014). The evolutionary neuroscience of musical beat perception: the Action Simulation for Auditory Prediction(ASAP)hypothesis. *Frontiers in systems neuroscience,* 8, 57.

Pecenka, N., & Keller, P. E. (2009). Auditory pitch imagery and its relationship to musical synchronization. *Annals of the New York Academy of Sciences, 1169*(1), 282–286.

Piccirilli, M., Sciarma, T., & Luzzi, S. (2000). Modularity of music: Evidence from a case of pure amusia. *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry, 69*(4), 541-545.

Prince, J. B., Thompson, W. F., & Schmuckler, M. A. (2009). Pitch and time, tonality and meter: How do musical dimensions combine? *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 35*(5), 1598.

Smith, M., & Joshi, A. (2020). Rhymes in the Flow: How Rappers Flip the Beat. University of Michigan Press.

Snyder, J. S., Gordon, R. L., & Hannon, E. E. (2024). Theoretical and empirical advances in understanding musical rhythm, beat and metre. *Nature Reviews Psychology, 3*(7), 449–462.

Sun, L., Thompson, W. F., Liu, F., Zhou, L., & Jiang, C. (2020). The human brain processes hierarchical structures of meter and harmony differently: Evidence from musicians and nonmusicians. *Psychophysiology, 57*(9), e13598.

Thomson, J. M., Fryer, B., Maltby, J., & Goswami, U. (2006). Auditory and motor rhythm awareness in adults with dyslexia. *Journal of research in reading, 29*(3), 334–348.

Tierney, A. T., & Kraus, N. (2013). The ability to tap to a beat relates to cognitive, linguistic, and perceptual skills. *Brain and language, 124*(3), 225–231.

Whitall, J., Chang, T. Y., Horn, C. L., Jung-Potter, J., McMenamin, S., Wilms-Floet, A., & Clark, J. E. (2008). Auditory-motor coupling of bilateral finger tapping in children with and without DCD compared to adults. *Human Movement Science, 27*(6), 914–931.

Wu, Q., Sun, L., Ding, N., & Yang, Y. (2024). Musical tension is affected by metrical structure dynamically and hierarchically. *Cognitive Neurodynamics,* 1–22.

Zhang, J., Che, X., & Yang, Y. (2019). Event-related brain potentials suggest a late interaction of pitch and time in music perception. *Neuropsychologia*, 107118

（通讯作者：杨玉芳 E-mail: yangyf@psych.ac.cn）

## . 作者贡献声明

孙丽君：提出研究思路，设计研究方案；
刘子儒：进行实验；
孙丽君，刘子儒：采集、清洗和分析数据；
孙丽君，杨玉芳，刘子儒：论文起草；
孙丽君，杨玉芳：论文最终版本修订。